

اثر باریت ضایعاتی بر رفتار قیر و مخلوط آسفالتی بررسی حساسیت رطوبتی و پایداری حرارتی

مقاله علمی - پژوهشی

امید انصاری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خیبری*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲

صفحه ۵۵۰-۵۳۳

چکیده

این پژوهش به بررسی اثرات کاربرد پودر باریت به عنوان فیلر و نانو باریت به عنوان اصلاح کننده قیر بر بهبود رفتار حساسیت رطوبتی و عملکرد حرارتی مخلوط‌های آسفالتی می‌پردازد. نمونه‌های آسفالتی با استفاده از پودر باریت به عنوان جایگزین فیلر معمولی (حالت اختلاط خشک) و قیر اصلاح شده با نانو باریت (حالت اختلاط تر) تهیه شدند. نتایج آزمایش‌های مقاومت مارشال و حساسیت رطوبتی حاکی از بهبود قابل توجه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی باریت در هر دو حالت اختلاط نسبت به نمونه‌های حاوی فیلر معمولی بود. به طور مشخص، حساسیت رطوبتی برای نمونه‌های حاوی ۶٪ باریت، ۴۰ درصد، ۹۲٪ در مقابل ۶۵٪ برای فیلر معمولی بهبود نشان داد. آزمون T نیز این بهبود آماری را تایید کرد. علاوه بر این، خواص قیر اصلاح شده با نانو باریت با استفاده از آزمایش‌های استاندارد قیر و آزمون کالری سنجی تفاضلی روبشی DSC، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج DSC نشان داد که اصلاح قیر با نانو باریت منجر به بهبود پایداری حرارتی قیر می‌شود. درجه نفوذ قیر اصلاح شده با ۵، ۳ و ۷ درصد نانو باریت، کاهش نشان داد، به ترتیب ۶۵، ۶۱ و ۵۷ در مقابل ۶۸ برای قیر شاهد، که نشان دهنده افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل حرارتی است.

واژه‌های کلیدی: پودر باریت، نانو مواد، اصلاح قیر، کالری سنجی تفاضلی روبشی، حساسیت رطوبتی

۱- مقدمه

در فناوری آسفالت گرم، با کاهش ویسکوزیته قیر و بهبود چسبندگی، به مقابله با این مشکل کمک می‌کنند و عملکرد آسفالت را بهبود می‌بخشند (Chitsazan, A., 2023). تعامل فیلر-قیر در کیفیت مخلوط آسفالتی مؤثر است؛ بنابراین شناخت خواص فصل مشترک این دو، برای بهبود کیفیت آسفالت ضروری است. مطالعه‌ای نشان داد که افزودن نانو مواد به قیر، مدول دینامیکی و مقاومت به خستگی مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. در این تحقیق، افزودن ۳٪ نانو مواد به قیر، مدول دینامیکی را تا ۲۵٪ افزایش داد. همچنین، آزمون خستگی نشان داد که عمر خستگی نمونه‌های حاوی نانو مواد، به طور قابل توجهی افزایش یافته است (Meng et al., 2023).

با توجه به نقش فیلر فعال در پر کردن فضای خالی و تاثیر آن بر چسبندگی قیر به مصالح سنگی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی باریت از جمله شکل ظاهری، بافت سطحی و سطح مخصوص، بر میزان قیر بهینه، رئولوژی مخلوط و در نهایت عملکرد مکانیکی آسفالت تاثیرگذار است. نتایج مطالعات نشان داده‌اند که فاکتور شکل و سطح ویژه، مهم‌ترین عوامل تعیین کننده در این رفتار هستند و شناخت آن‌ها به ساخت ماستیک با فصل مشترک پایدار کمک می‌کند (Xing, et.al., 2024). رطوبت موجود در سنگدانه قبل از اختلاط، با جلوگیری از اتصال قیر و سنگدانه، حساسیت رطوبتی آسفالت را افزایش می‌دهد و موجب عریان‌شدگی می‌شود. افزودنی‌های آلی و شیمیایی و معدنی،

همچنین، با کاهش نفوذپذیری و افزایش استحکام، شرایط بهتری برای مقابله با تغییرات دما و بارهای ترافیکی فراهم می‌آوردند که به جلوگیری از ترک خوردگی و تخریب زودرس در لایه‌های قیر کمک می‌کند. (Alfaqawi, et.al., 2021)

در سال‌های اخیر، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از مواد پودری ضایعاتی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، می‌تواند مزایای زیست‌محیطی نیز به همراه داشته باشد. به عنوان مثال، استفاده از خاکستر بادی، سرباره فولادسازی، و پودر لاستیک ضایعاتی به عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالتی، مورد بررسی قرار گرفته است این مواد، علاوه بر پر کردن فضاهای خالی، می‌توانند خواص رئولوژیکی قیر را نیز تحت تاثیر قرار داده و باعث بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی و تغییر شکل دائمی شوند (Jwaida, et.al., 2024). در کاربرد انواع ضایعات، به ویژه ضایعات کانیها و مواد خاص، با توجه به محدودیت منابع طبیعی و افزایش مصرف انرژی و آگاهی از مسائل زیست‌محیطی، استفاده از مواد بازیافتی و ضایعاتی در مهندسی عمران مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که ترکیه دارای ذخایر غنی "بور" است، پژوهش‌ها در زمینه کاربرد ضایعات بور در ساخت و ساز، از جمله در روسازی آسفالتی، پتانسیل بالایی را نشان می‌دهند. این ضایعات می‌توانند به عنوان جایگزینی برای مواد سنتی، بهبود عملکرد و کاهش اثرات زیست‌محیطی را به همراه داشته باشند (Karshoğlu, et.al. 2022)

در خصوص کاربرد باریت، در مطالعه‌ای، یک سرامیت مبتنی بر آلومینوسیلیکات باریت (BASC) با استفاده از باکلیت، زغال‌سنگ و باریت توسعه یافته است. نتایج نشان داد که افزودن باریت به افزایش چگالی ظاهری سرامیت کمک کرده ولی مقاومت نهایی آن را کاهش می‌دهد.

سرامیت می‌تواند به کاهش انقباض خودبخودی و افزایش مقاومت در برابر اشعه گاما در بتن پر مقاومت فوق‌العاده با کارایی بالا کمک کند (Zhang, et.al., 2024) در خصوص کاربرد همزمان باریت و مواد پلیمری، رزین‌های اپوکسی تقویت‌شده با باریت به عنوان جایگزینی اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست برای مواد حفاظتی در برابر اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفتند. بهبود توزیع باریت و جلوگیری از ته‌نشینی با استفاده از اسید استناریک و فرآیند آسیاب مایع باعث افزایش ویژگی‌های مکانیکی و عملکرد این کامپوزیت‌ها شد (Lopresti, et.al., 2021). همچنین مطالعه‌ای بررسی می‌کند که ذرات غیر

در حال حاضر، پژوهشگران بر این باورند که ماستیک آسفالت، که از پراکندگی فیلر در چسبنده‌ی آسفالتی تشکیل می‌شود، نقش مهمی در پیوند بین دانه‌های درشت و ریز، پر کردن خلل و فرج و انتقال بارها ایفا می‌کند. خواص فیزیکی و شیمیایی فیلر معدنی بر خواص مکانیکی ماستیک و عملکرد روسازی آسفالت تأثیرگذار است (Tian, et al., 2021).

حساسیت رطوبتی یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب روسازی‌های آسفالتی است. رطوبت می‌تواند باعث کاهش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی شده و در نتیجه، منجر به جداشدگی و تخریب آسفالت شود. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که استفاده از فیلرهای مناسب و نانو مواد می‌تواند حساسیت رطوبتی آسفالت را کاهش دهد (Nabiun, et.al., 2024). به خلاف فیلرهای معدنی سنتی که عمدتاً از مواد معدنی سیلیکونی و کلسیمی تشکیل شده‌اند، گل قرمز عمدتاً حاوی مقادیر زیادی اکسید آلومینیوم و اکسید آهن است که رنگ آن را اغلب قرمز یا قهوه‌ای می‌کند. ذرات گل قرمز ریزتر بوده و حدود ۸۰٪ آن‌ها از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متری عبور می‌کند (Dimulescu, & Burlacu, 2021; Tian, et al., 2021). مگنتیت، اکسید آهنی با خاصیت فرومغناطیسی است و فرمول شیمیایی آن Fe_3O_4 است. مواد مگنتیتی، به عنوان فیلرهای غیرآلی در پلیمرها برای کاهش صدا به کار می‌روند. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن مگنتیت به سیستم‌های پلیمری مانند آسفالت، به طور مؤثری خواص مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت را بهبود می‌بخشد. وجود مگنتیت در آسفالت به بهبود جذب میکروویو و کارایی حرارتی کمک می‌کند و قابلیت خودترمیمی آسفالت را افزایش می‌دهد (Nabiun, et.al., 2024; Zhu, et.al., 2017).

پایداری حرارتی قیر و آسفالت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به خصوص در مناطقی با آب و هوای گرم. تغییرات دمایی شدید می‌تواند منجر به نرم شدن و تغییر شکل آسفالت در دماهای بالا و ترک خوردگی آن در دماهای پایین شود. استفاده از نانو مواد، می‌تواند پایداری حرارتی قیر را بهبود بخشد (Zhang, et.al., 2021). فیلرهای معدنی، به ویژه فیلرهای ضایعاتی، نقش مهمی در بهبود عملکرد حرارتی قیر و کاهش پیرشدگی آن در روسازی دارند. این فیلرها با بهبود خواص رئولوژیکی قیر، انتقال حرارت و خواص چسبندگی بین مصالح را افزایش می‌دهند.

رطوبتی (TSR) برای ارزیابی عملکرد مکانیکی و آزمون DSC برای بررسی پایداری حرارتی قیر اصلاح شده انجام شد. پژوهش حاضر، با استفاده از آزمایش‌های استاندارد مانند آزمایش آشتو T-283 حساسیت رطوبتی و آزمون کالری‌سنجی تفاضلی رطوبتی DSC برای ارزیابی پایداری حرارتی، به بررسی تأثیر مقادیر مختلف باریت بر مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع، و بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با قیر اصلاح شده با باریت می‌پردازد. همچنین، آزمون‌های استاندارد قیر (نفوذ، نرمی، کشسانی) بر روی قیر اصلاح شده با مواد نانو مقیاس صورت گرفت. پیش‌بینی می‌شود استفاده از باریت و نانو باریت، دوام و مقاومت آسفالت را افزایش داده، هزینه‌های نگهداری را کاهش دهد و با استفاده از ضایعات باریت، به حفظ محیط زیست کمک کند. تولید آسفالت‌های ویژه با خواص بهبود یافته برای شرایط خاص (مناطق گرمسیری یا پرترد) نیز از دیگر مزایای این روش است، هرچند تحقیقات بیشتر برای بررسی اثرات بلندمدت و بهینه‌سازی فرآیند ضروری است.

نتایج این تحقیق به درک بهتر مکانیسم‌های اثر باریت بر رفتار قیر و آسفالت و بهینه‌سازی طراحی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از این ماده ضایعاتی کمک خواهد کرد. محدودیت‌های استفاده از فیلر، نسبت وزنی فیلر به قیر ۰/۶ تا ۱/۲، نیز در این پژوهش مدنظر قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش با هدف بررسی اثر باریت ضایعاتی بر بهبود رفتار قیر و مخلوط آسفالت و به طور خاص کاهش حساسیت رطوبتی و ارتقاء پایداری حرارتی، بر پایه یک رویکرد آزمایشگاهی استوار است. دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه کشور به عنوان الگوی دانه بندی مصالح سنگی انتخاب شده است، زیرا این دانه بندی یکی از پرکاربردترین دانه بندی در سطح کشور بوده و نتایج حاصل از آن قابلیت تعمیم خواهد داشت. جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، آزمون‌های استاندارد تعیین شده برای این منظور، از جمله آزمون مارشال و آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم در دو حالت خشک و اشباع، به کار گرفته خواهند شد. نسبت مقاومت کششی TSR به عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان کاهش مقاومت در اثر رطوبت، محاسبه و تحلیل خواهد شد. برای بررسی پایداری حرارتی قیر اصلاح شده

آلی حاصل از ضایعات معدنی می‌توانند به‌عنوان افزودنی در قیر مورد استفاده قرار گیرند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن تا ۱۰٪ وزنی پرکننده فیلر، موجب بهبود خواص مکانیکی قیر و افزایش دوام آن می‌شود، که ناشی از برهم‌کنش‌های فیزیکی و شیمیایی بین قیر و پرکننده است (Calandra, et.al., 2022). استفاده از نانو مواد مانند نانو سیلیکا و نانو ذرات معدنی در مخلوط‌های آسفالتی تأثیر قابل توجهی بر کاهش اثرات حرارتی دارد. این نانوذرات به بهبود خواص مکانیکی و حرارتی مخلوط‌ها کمک کرده و از پدیده‌های مانند موج شدگی و آسیب رطوبتی جلوگیری می‌کنند. در نتیجه، نانو مواد موجب افزایش پایداری و عمر مفید روسازی‌های آسفالتی خواهند شد. (Abdel-Wahed, et.al., 2022)

تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از نانوذرات Al_2O_3 به قیرهای خالص و اصلاح شده، خواص آن‌ها را در دماهای بالا و میانه بهبود می‌بخشد. این بهبود شامل افزایش سفتی، پایداری در ذخیره‌سازی، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی و تحمل ترک خوردگی است. بتن آسفالتی اصلاح شده با این نانوذرات، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل، ترک خوردگی و آسیب رطوبتی از خود نشان می‌دهد. در این میان، ترکیبات مختلف نانو Al_2O_3 با درصد‌های متفاوت، عملکردهای متفاوتی در زمینه‌های گوناگون از خود نشان داده‌اند. در پژوهشی اثر نانوذرات سیلیکا دودی (FSNPs) را بر خواص رئولوژیکی آسفالت لاستیکی (TBRA) بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد FSNPs به طور موثری کشسانی در دمای بالا، مقاومت در برابر خستگی و تغییر شکل را افزایش می‌دهد، که به ساختار شبکه‌ای منحصراً به فرد آن‌ها نسبت داده می‌شود. FSNPs همچنین پایداری حرارتی TBRA را بهبود می‌بخشد و تخریب عملکرد در دمای پایین حداقل است. نسبت‌های بهینه FSNPs برای ویسکوزیته مناسب نیز تعیین شده‌اند (Shi & Zhou, 2024).

در نهایت، مطالعات نشان می‌دهد موادی نانومقیاس یا پودری، می‌توانند خواص مکانیکی، مقاومت در برابر رطوبت و پایداری حرارتی آسفالت را ارتقا دهند، هرچند مقدار بهینه آن‌ها به نوع قیر، مصالح سنگی و شرایط محیطی وابسته است. این پژوهش با تولید نمونه‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف پودر و نانو باریت به‌عنوان جایگزین فیلر و اصلاح‌کننده قیر، به بررسی این موضوع پرداخت. آزمایش‌های مقاومت مارشال، حساسیت

ضایعاتی به عنوان یک افزودنی در مخلوط‌های قیری و آسفالتی، به دلیل خواص فیزیکی (وزن مخصوص بالا، جذب آب)، شیمیایی (واکنش‌پذیری پایین) و قیمت پایین، می‌تواند در بهبود عملکرد مکانیکی (افزایش مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی)، دوام (کاهش حساسیت به رطوبت و اکسیداسیون و پیرشدگی)، و خواص رئولوژیکی (بهبود ویسکوزیته و پایداری حرارتی قیر) در مناطق گرمسیر موثر باشد.

۲-۲- آنالیز ریزساختاری و گرماسنج روبشی

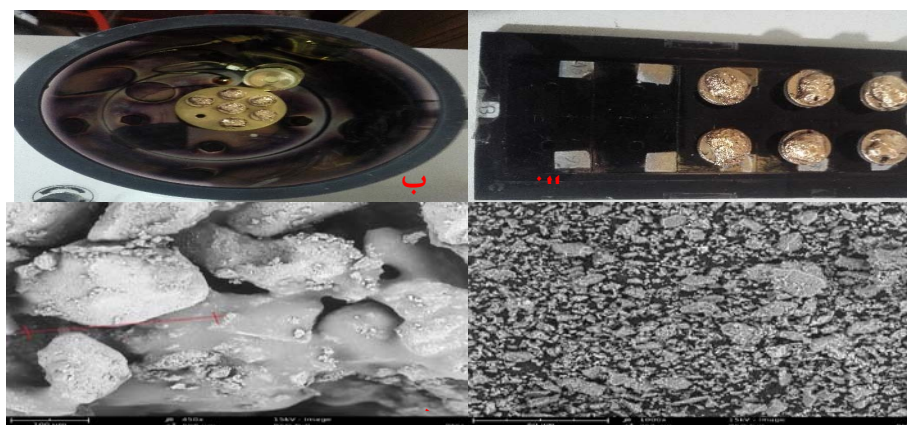
به منظور بررسی دقیق اثرات افزودن باریت ضایعاتی بر ریزساختار قیر و آسفالت، از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM استفاده شد. این تکنیک امکان تصویربرداری با بزرگنمایی بالا از سطح نمونه‌ها را فراهم می‌آورد. در این راستا، نمونه‌ها به منظور افزایش هدایت الکتریکی و جلوگیری از ایجاد بار سطحی، مطابق شکل ۱، با لایه‌ای نازک از طلا به ضخامت تقریبی ۱۰۰ آنگستروم با استفاده از روش رسوب‌دهی فیزیکی بخار PVD پوشش داده شدند. تصاویر SEM به دست آمده از پودر باریت، نمایانگر بافت دانه‌ای با ذراتی عموماً مکعبی شکل و منظم بود و توده‌ای نبودن ذرات باریت در مقایسه با فیلرهای مورد استفاده در مصالح آسفالتی به خوبی مشهود بود که این ویژگی می‌تواند بر خواص رئولوژیکی و عملکرد آسفالت تاثیرگذار باشد.

با باریت، از روش آنالیز حرارتی تفاضلی DSC استفاده خواهد شد. امکان تعیین دماهای انتقال فازی و ارزیابی تغییرات انرژی مرتبط با این انتقال‌ها را فراهم می‌آورد و به این ترتیب، می‌توان تاثیر باریت بر رفتار حرارتی قیر را مورد بررسی قرار داد.

۲-۱- معرفی باریت ضایعاتی

باریت $BaSO_4$ یک ماده معدنی سولفات باریت با فرمول شیمیایی $BaSO_4$ ، از نظر تئوری حاوی ۶۵٫۷٪ اکسید باریت BaO و ۳۴٫۳٪ تری‌اکسید گوگرد SO_3 است. این ماده معدنی با سختی بین ۲/۵ تا ۳/۵ در مقیاس موس، به دلیل چگالی بالا (ناشی از وزن اتمی باریت) به "باریت"، به معنای "سنگین" در یونانی، معروف است. باریت معمولاً با کانی‌های دیگری مانند کوارتز و کلسیت همراه است و در سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگ یافت می‌شود و میزان جذب آب آن نسبتاً بالا است.

چین بزرگترین تولیدکننده باریت است و پس از آن کشورهای هند، مراکش، ایالات متحده آمریکا، ایران و ترکیه قرار دارند. باریت با حدود ۸۵٪ مصرف جهانی در صنعت نفت و گاز (به عنوان عامل افزایش وزن در سیالات حفاری) کاربرد گسترده‌ای دارد. همچنین، در صنایع رنگ‌سازی، پلاستیک، کاغذ، لاستیک (به عنوان ماده پرکننده)، ساخت بلوک‌های سیمانی محافظ در برابر اشعه، و در ساخت ایستگاه‌ها و باندهای فرودگاه (مخلوط با لاستیک و آسفالت) استفاده می‌شود. استفاده از باریت



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM از باریت: (الف) فرآیند آسه‌آرای طلا، (ب) نمونه‌های آماده‌سازی شده، (ج) بزرگنمایی پایین، (د) بزرگنمایی بالا

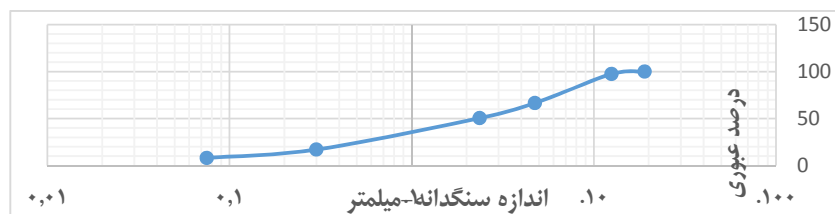
اکسید روی بر خواص رئولوژیکی قیر آسفالتی با درجه نفوذ B50/70 پرداخته است. مقادیر مختلف NC ۸٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ و NZnO، ۱٪، ۲٪ و ۳٪ بر اساس وزن قیر ارزیابی شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های رئومتر برشی دینامیکی، نقطه نرمی، نفوذ، نقاط اشتعال و احتراق، رئومتر تیر خمشی و ویسکوزیته نشان داد که افزودن این نانومواد موجب کاهش نفوذ و افزایش نقاط اشتعال و احتراق، ویسکوزیته و SP می‌شود. بهبود جزئی در خواص رئولوژیکی قیر در دماهای بالا مشاهده شد، در حالی که افزودن NC یا NZnO منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد قیر و مقاومت در برابر ترک خوردگی در دماهای پایین گردید. مقادیر بهینه NC و NZnO به ترتیب ۱۰٪ و ۳٪ وزنی قیر تعیین شدند (Al-Omari et al., 2023). این یافته‌ها نشان می‌دهد که آزمون DSC به‌عنوان یک روش مؤثر در ارزیابی رفتار حرارتی قیرهای اصلاح‌شده با نانومواد عمل می‌کند و می‌تواند در کنار سایر آزمایش‌ها، به بهبود شناسایی عملکرد و پایداری قیر در شرایط مختلف دمایی کمک کند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده از نظر اندازه به سه قسمت درشت دانه، ریزدانه و فیلر تقسیم می‌شوند. این مصالح پس از اینکه به وسیله الک‌های استاندارد تفکیک شدند با شرایط مشخصی مخلوط شده و دانه‌بندی مورد نیاز برای مخلوط آسفالتی مورد نظر را فراهم می‌نمایند. جنس مصالح مورد استفاده آهکی بوده و از معدن رودخانه فهلیان در ۱۰ کیلومتری شهر نورآباد ممسنی تهیه شده است. از آنجایی که مصالح به کار رفته در ساخت مخلوط آسفالتی باید مشخصات لازم طبق آیین نامه ۲۳۴ را داشته باشد، آزمایش‌های وزن مخصوص سنگ‌دانه، ارزش ماسه‌ای، شکل دانه‌ها، درصد شکستگی و سلامت بر روی سنگ دانه‌های تهیه مطابق جدول ۱، انجام شد. حدود دانه‌بندی شماره ۴ مخلوط آسفالتی توپر و نیز دانه بندی منتخب در این تحقیق در شکل ۲، آمده است.

آزمون گرماسنج روبشی تفاضلی به عنوان یک تکنیک کلیدی در ارزیابی خواص حرارتی قیر و مخلوط‌های آسفالتی حاوی باریت ضایعاتی، امکان تعیین انتقال‌های فازی، پایداری حرارتی و تغییرات انرژی مرتبط با فرایندهای گرماده و گرماگیر را فراهم می‌آورد. در این آزمایش، نمونه‌های قیر و آسفالت حاوی درصد‌های مختلف باریت ضایعاتی و نمونه شاهد (بدون باریت) به طور همزمان با یک ماده مرجع بی‌اثر حرارتی، تحت یک برنامه دمایی کنترل‌شده گرم یا سرد می‌شوند. تفاوت در میزان انرژی مورد نیاز برای حفظ این دو نمونه در دمای یکسان، به عنوان جریان حرارتی ثبت می‌گردد و از آن، منحنی روبشی تفاضلی به دست می‌آید. پیک‌های حاصل در منحنی روبشی تفاضلی نمایانگر انتقال‌های فازی مانند دمای شیشه‌ای شدن قیر و ذوب شدن اجزای کریستالی موجود در آسفالت هستند. با تحلیل دقیق این پیک‌ها، می‌توان اثر باریت ضایعاتی بر دمای شیشه‌ای شدن قیر، تغییر در محدوده ذوب و همچنین تغییرات در آنتالپی ناشی از افزودن این ماده را بررسی نمود. تغییرات در Tg می‌تواند اطلاعات مهمی درباره بهبود یا کاهش انعطاف‌پذیری قیر در دماهای پایین ارائه دهد. علاوه بر این، منحنی روبشی تفاضلی می‌تواند برای ارزیابی پایداری حرارتی نمونه‌ها در دماهای بالا مورد استفاده قرار گیرد، و می‌توان دمای آغاز تجزیه حرارتی و میزان وزن از دست رفته در طول آزمایش را تعیین کرد. این اطلاعات برای تعیین میزان مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر اکسیداسیون و پیری ناشی از دماهای بالا بسیار حیاتی است. در پژوهشی با هدف ارزیابی حساسیت حرارتی قیرهای اصلاح‌شده با نانومواد معدنی، از آزمون کالری‌سنجی تفاضلی روبشی استفاده شده است. هدف اصلی این آزمون، تعیین کمیت تغییرات حرارتی و دمایی ناشی از افزودن نانوذرات معدنی به قیر و بررسی تأثیر آن بر پایداری حرارتی و خواص ترموفیزیکی آسفالت بوده است. نتایج حاصل از آزمون روبشی تفاضلی در کنار سایر آزمایش‌ها، مانند تعیین شاخص نفوذ و حساسیت ویسکوزیته-دما، به ارزیابی جامع‌تری از رفتار حرارتی قیرهای اصلاح‌شده کمک نمود (Yilmaz et al., 2023). در همین راستا، تأثیر حرارتی نانومواد بر عملکرد قیر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه‌ای به بررسی تأثیر نانورس و نانو



شکل ۱. دانه‌بندی منتخب مصالح سنگی مطابق نشریه ۲۳۴ نظام فنی کشور

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش

استاندارد آزمایش		مقدار مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش	شرح
ASTM	AASHTO	رویه	آستر		
C131	T96	۳۰	۴۰	۱۸	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس (درصد)
-	T96	۲۵	۳۰	۷/۱۴	حداکثر ضریب تورق به روش BS 812 (درصد)
D5821	-			۹۸	درصد شکستگی در یک وجه
D5821	-	۹۰	۸۰	۹۷	حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ۴
D5821	-	۲/۵	۲/۵	۱/۴	حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)
-	T85	۲/۵	۲/۸	۱/۶	حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)
C127				۲/۶۶۷	وزن مخصوص مصالح درشت دانه
C128				۲/۷۱۱	وزن مخصوص مصالح ریزدانه
C188				۲/۶۴۵	وزن مخصوص فیلر
C128				۲/۱۴	درصد جذب آب فیلر

۲-۳- فیلر مصالح سنگی و باریت

شماره ۲۰۰) و پودر باریت به عنوان فیلر استفاده شده است. شکل ۳، فیلر معمولی-آهکی و پودر باریت مورد استفاده در این پژوهش را نشان داده است. جدول ۲، به صورت تقریبی و با استناد به اطلاعات عمومی موجود، برخی از ویژگی‌های کلیدی این دو فیلر را مقایسه می‌کند.

با توجه به این‌که فیلر در مخلوط آسفالتی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند، لذا متغیر تحقیق درصد و نوع ماده ای که در این تحقیق به عنوان فیلر مورد استفاده قرار گرفته است، فیلرها با توجه به ویژگی‌های خود علاوه بر پرکردن فضای خالی مصالح، تاثیرات متفاوتی نیز بر روی مخلوط آسفالتی خواهند داشت در این مطالعه از فیلر مصالح سنگی (رد شده از الک

جدول ۲. مشخصات عمومی فیلرهای مصالح سنگی و باریت بکاررفته در این مطالعه

ویژگی	باریت (BaSO ₄)	آهک (CaCO ₃)	واحد	توضیحات
وزن مخصوص	۴/۳-۴/۶	۲/۶-۲/۸	g/cm ³	وزن مخصوص باریت به طور قابل توجهی از آهک بیشتر است، که آن را در کاربردهایی مانند مواد سنگین‌کننده در حفاری نفت مفید می‌سازد.
سختی موس	۳-۳/۵	۳		سختی این دو ماده تقریباً یکسان است.
pH	۶-۸	۸-۹		آهک معمولاً خاصیت قلیایی بیشتری نسبت به باریت دارد.
اندازه ذرات	متغیر، بسته به فرآوری	متغیر، بسته به فرآوری	میکرومتر (μm)	اندازه ذرات تاثیر بسزایی بر خواص رئولوژیکی و پخش شوندهگی فیلرها دارد.
ضریب شکست نوری	۱/۶۴	۱/۵-۱/۷		این ویژگی در کاربردهای رنگ و پوشش اهمیت دارد.
حلالیت در آب	بسیار کم	کم	g/L	حلالیت هر دو ماده در آب بسیار کم است، اما حلالیت آهک کمی بیشتر از باریت است.
نقطه ذوب	۱۵۸۰ °C	(۸۲۵ درجه سانتی گراد) تجزیه می‌شود	°C	باریت نقطه ذوب بالاتری دارد و در دماهای بالا پایدارتر است.

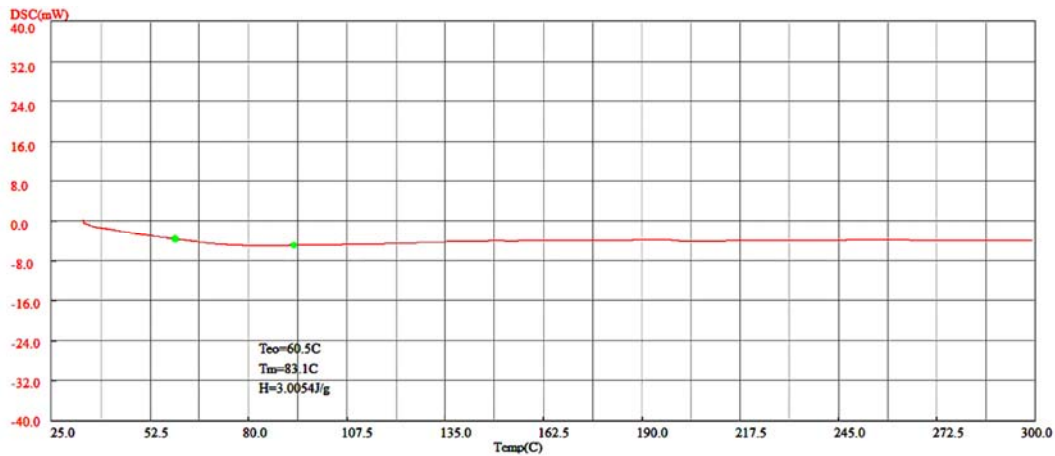


شکل ۳. الف). تصویر پودر آهک به عنوان فیلم معمولی، ب) تصویر میکروسکوپی پودر باریت به عنوان فیلم پیشنهادی

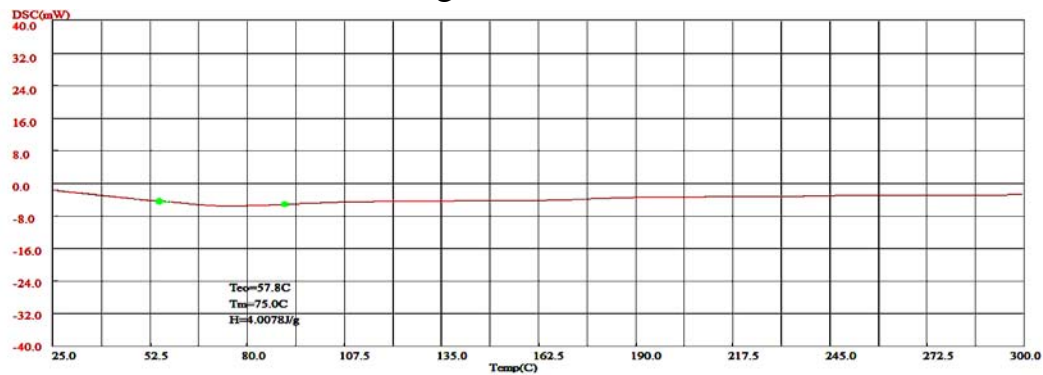
۳-۳- تحلیل حرارتی و ریزساختاری

می‌کنند. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ و جدول ۳، نتایج آزمایش DSC برای قیرهای اصلاح شده با ۳٪، ۵٪ و ۷٪ نانو باریت را نشان می‌دهد.

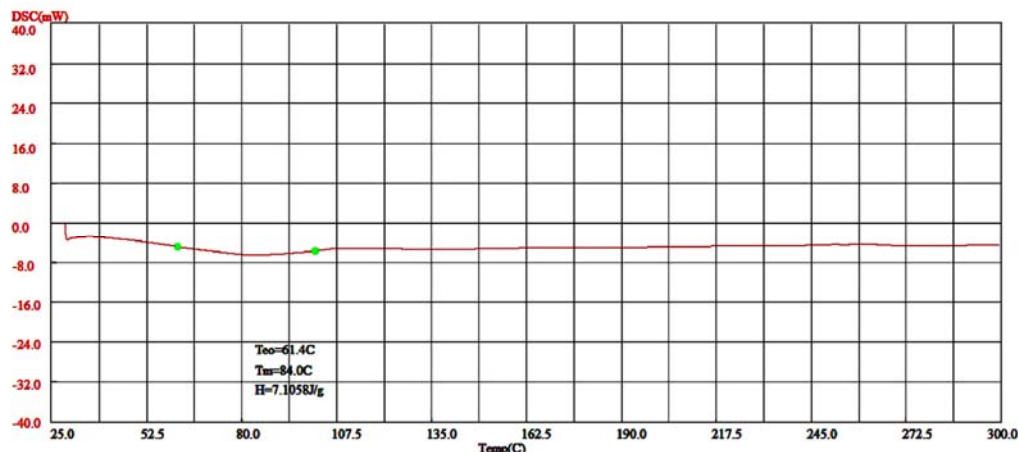
یکی از مهمترین روش‌های تحلیل حرارتی، گرماسنج روبشی تفاضلی می‌باشد. منظور از ویژگی‌های فیزیکی، کمیت‌هایی مانند اندازه هندسی، ظرفیت حرارتی، هدایت الکتریکی و مانند آن است که با افزایش دمای نمونه تغییر



شکل ۴. نتیجه آزمایش DSC برای قیر اصلاح شده با ۳٪ نانو باریت



شکل ۵. نتیجه آزمایش DSC برای قیر اصلاح شده با ۵٪ نانو باریت



شکل ۶. نتیجه آزمایش DSC برای قیر اصلاح شده با ۷٪ نانو باریت

جدول ۳. نتایج آزمون DSC بر روی نمونه‌های حاوی نانو باریت

میزان گرماگیری واکنش (j/gr)	نقطه ذوب انتهایی (درجه سانتی‌گراد)	نقطه ذوب میانی (درجه سانتی‌گراد)	نقطه ذوب ابتدایی (درجه سانتی‌گراد)	درصد افزودنی باریت
۳/۰۰۵۴	۹۲/۶	۸۳/۱	۶۰/۵	۳٪
۴/۰۰۷۸	۹۱/۱	۷۵	۵۷/۸	۵٪
۷/۱۰۵۸	۱۰۰/۵	۸۴	۶۱/۴	۷٪

شده، تغییرات ناچیز در نقاط ذوب، ابتدا کاهش اندک و سپس افزایش، نشان‌دهنده آن است که افزودن نانو باریت تاثیر قابل توجهی بر تغییر فاز قیر ندارد. این احتمالاً به دلیل آن است که باریت به صورت فیزیکی در قیر پراکنده شده و در ساختار شیمیایی قیر تغییری ایجاد نمی‌کند. اما، افزایش قابل توجه در میزان گرماگیری واکنش با افزایش درصد نانو باریت، نشان‌دهنده آن است که ماستیک اصلاح شده برای رسیدن به دمای مشخص، به انرژی بیشتری نیاز دارد. این امر می‌تواند ناشی از افزایش ظرفیت حرارتی ماستیک به دلیل حضور باریت با چگالی بالا و نیز افزایش سطح تماس بین قیر و نانوذرات باشد. این ویژگی می‌تواند در عمل به معنای حفظ بهتر دما در حین اختلاط ماستیک با مصالح سنگی و در نتیجه بهبود کارپذیری آسفالت باشد. افزایش ظرفیت حرارتی ماستیک به صورت مستقیم با درصد وزنی باریت در مخلوط مرتبط است. هرچه درصد باریت بیشتر باشد، ظرفیت حرارتی ماستیک نیز بیشتر خواهد بود. این فرمول را می‌توان به صورت کلی، به شکل رابطه (۱) نمایش داد.

اثر افزودن نانوذرات باریت ($BaSO_4$) به قیر به صورت اختلاط تر، پدیده‌ای پیچیده است که هم به تعاملات شیمیایی و فیزیکی سطح نانوذرات با قیر و هم به تغییرات مکانیکی ناشی از پراکندگی آنها در ماتریس قیر وابسته است. مطابق شکل‌های ۴، ۵ و ۶ و جدول ۳، در ابتدا، افزودن نانوذرات باریت با مساحت سطح بالا، سبب افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود، زیرا این ذرات به عنوان مراکز برهم‌کنش در محیط قیر عمل کرده و از حرکت آزادانه زنجیره‌های هیدروکربنی قیر جلوگیری می‌کنند. از منظر شیمیایی، سطوح نانوذرات باریت می‌توانند برهم‌کنش‌های واندروالسی با اجزای قیر، به ویژه با ترکیبات آروماتیک و قطبی، برقرارکنند. این برهم‌کنش‌ها می‌توانند به تشکیل یک شبکه سه‌بعدی از نانوذرات در ماتریس قیر منجر شوند، که به نوبه خود باعث بهبود استحکام و مقاومت حرارتی قیر می‌شود. با این حال، اگر پراکندگی نانوذرات به درستی انجام نشود، تجمع آنها می‌تواند به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و باعث کاهش خواص مکانیکی قیر شود. در خصوص نتایج آزمون DSC ارائه

$$\Delta Q = m \times c \times \Delta T$$

(۱)

که در آن:

ΔQ = مقدار گرمای جذب شده

m = جرم ماده (ماستیک قیری اصلاح شده)

c = ظرفیت حرارتی ویژه (وابسته به درصد باریت)

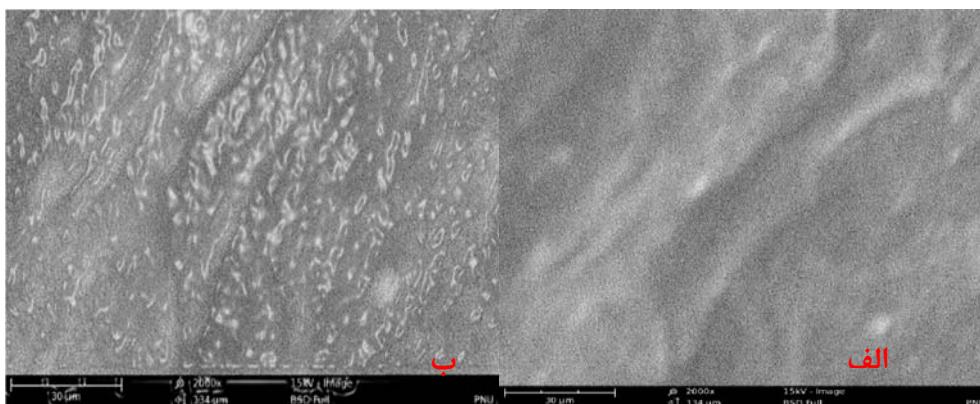
ΔT = تغییرات دما (دماهای متفاوت روسازی)

دمای بالا شده و از تغییر شکل دائمی روسازی آسفالتی جلوگیری می‌کند. حضور نانو باریت همچنین می‌تواند بر عملکرد حرارتی قیر تاثیر بگذارد. این نانو ذرات به عنوان یک فاز پراکنده عمل کرده و هدایت حرارتی قیر را بهبود می‌بخشند. این امر منجر به توزیع یکنواخت‌تر دما در داخل روسازی شده و از ایجاد تنش‌های حرارتی موضعی و ترک خوردگی حرارتی جلوگیری می‌کند. از نظر عملکرد مکانیکی، وجود نانو باریت با تقویت ساختار قیر، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی آن را افزایش می‌دهد، که با نتایج سایر تحقیقات همراه است.

(Chakravarty, & Sinha, 2020).

حضور نانو باریت می‌تواند تاثیرات مثبتی بر عملکرد فیزیکی و شیمیایی قیر داشته باشد. ذرات نانو باریت با کاهش نفوذپذیری قیر، مقاومت به رطوبت آن را افزایش می‌دهند و از جداشدگی قیر از سنگدانه‌ها جلوگیری می‌کنند. همچنین، این نانو ذرات می‌توانند به عنوان یک سد محافظ در برابر عوامل مخرب محیطی مانند اکسیداسیون و پیرشدگی و اشعه UV عمل کرده و پایداری شیمیایی قیر را بهبود بخشند. در نتیجه، اصلاح قیر با نانو باریت می‌تواند منجر به تولید روسازی آسفالتی با عمر طولانی‌تر، عملکرد بهتر و مقاومت بیشتر در برابر عوامل مخرب محیطی گردد.

ظرفیت حرارتی ویژه (c) ماستیک با افزایش درصد باریت افزایش می‌یابد. بنابراین، برای یک تغییر دمای مشخص (ΔT) و یک جرم مشخص (m)، مقدار گرمای جذب شده (ΔQ) نیز افزایش می‌یابد. البته، و در عمل، عوامل دیگری مانند اندازه ذرات باریت، توزیع یکنواخت آن در قیر، و نوع قیر نیز بر میزان گرماگیری تاثیرگذار هستند. شکل ۷، عکس‌های SEM مربوط به نمونه‌ها را نشان می‌دهد عکس برداری از سطوح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر را دارد و این آزمایش در مرکز نانو فناوری یزد تهیه گردیده‌اند. تصویر ریزساختاری SEM قیر اصلاح شده با نانو باریت، اطلاعات ارزشمندی در خصوص تاثیر این افزودنی نانو بر رفتار و عملکرد قیر ارائه می‌دهد. مشاهده‌ی نانو باریت به صورت ذرات پراکنده در سطح و داخل ساختار قیر، به همراه ناهمواری‌های ایجاد شده، نشان‌دهنده‌ی ایجاد یک شبکه درونی مستحکم است. این شبکه ناشی از برهمکنش بین ذرات نانو باریت و مولکول‌های قیر، به طور قابل توجهی رفتار رئولوژیکی قیر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طور خاص، می‌توان انتظار داشت که ویسکوزیته قیر افزایش یابد و حساسیت آن به تغییرات دما کاهش یابد. این امر منجر به بهبود مقاومت شیارشدگی در



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مخلوط قیر-باریت: الف) بزرگنمایی پایین، ب) بزرگنمایی بالا

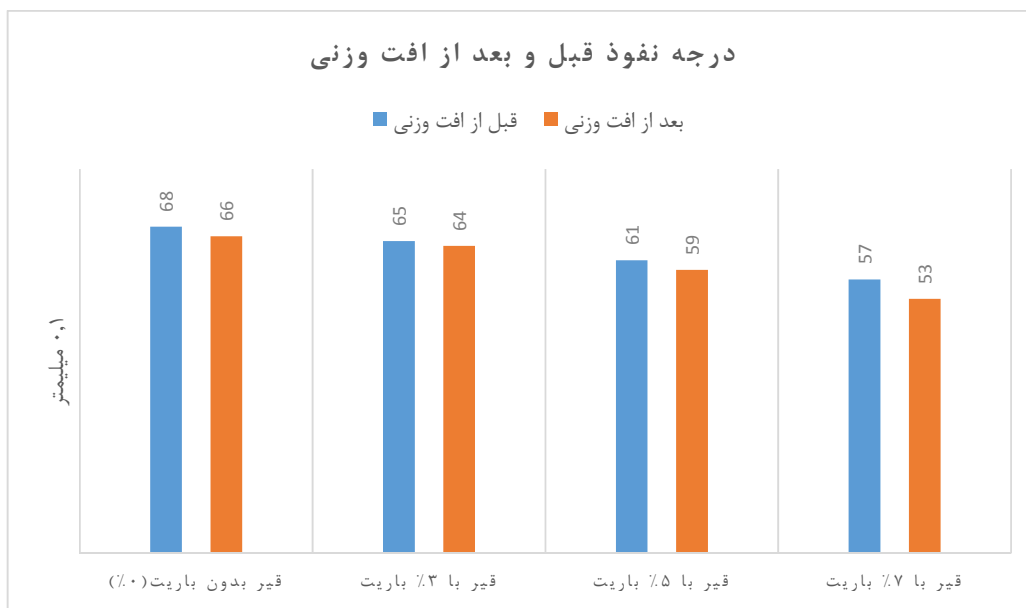
۳-۴- نتایج آزمایش‌های متداول قیر حاوی ذرات باریت

۴ ساخته شد و آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، قابلیت کشش، وزن مخصوص، لعاب نازک و نقطه اشتعال بر روی آنها صورت گرفت و نتایج آن در شکل‌های ۸ تا ۱۱ ارائه شده است.

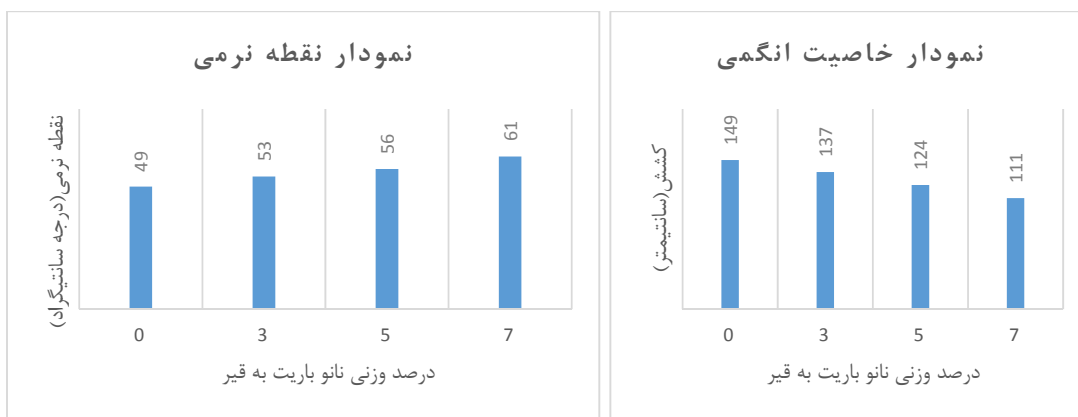
به منظور ارزیابی اثر نانو باریت بر خصوصیات مخلوط فیلر-قیر، باتوجه به درصدهای فیلر مصالح سنگی و پودر باریت در مخلوط‌های آسفالتی و در نظر گرفتن میزان قیر موثر در مخلوط، نمونه‌های فیلر-قیر مطابق با مشخصات جدول

جدول ۱. نتایج آزمون‌های متداول قیر پایه و قیر با افزودنی

۷	۵	۳	پایه	نوع آزمایش/درصد افزودنی
۵۷	۶۱	۶۵	۶۸	درجه نفوذ (۰/۱۰ میلی‌متر)
۶۱	۵۶	۵۳	۴۹	نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)
۱۱۱	۱۲۴	۱۳۷	۱۴۹	قابلیت کشسانی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌متر)
۱/۱۸	۱/۱۷	۱/۱۵	۱/۱۲	وزن مخصوص (g/cm ³)
۷	۵	۳	۰	نوع آزمایش/درصد افزودنی
۳۰۵	۳۰۳	۳۰۹	۲۹۷	نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)
۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۴۵	افت وزنی (درصد)
۵۳	۵۹	۶۴	۶۶	درجه نفوذ بعد از افت وزنی (۰/۱۰ میلی‌متر)
۹۵/۵۹	۹۵/۴۵	۹۵/۳۸	۸۸/۰۶	نسبت درجه نفوذ بعد به قبل از افت وزنی (درصد)

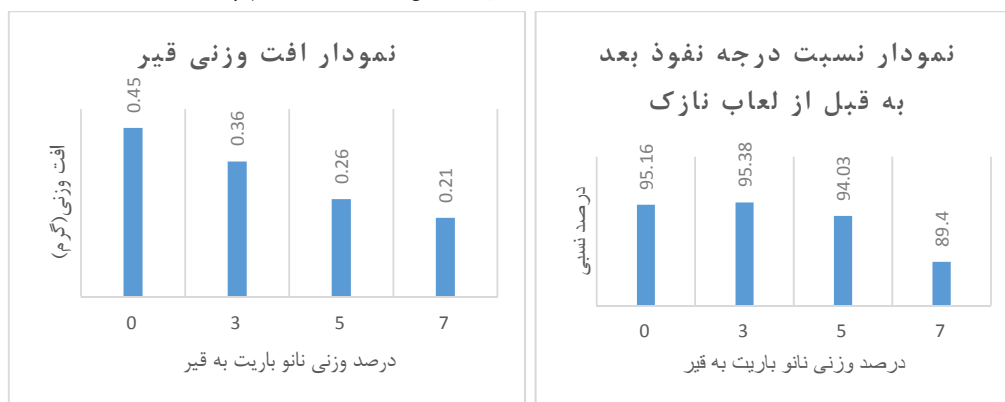


شکل ۸. نمودار تغییرات درجه نفوذ قبل و بعد از افت وزنی



شکل ۹. تغییرات نقطه نرمی در مقابل میزان نانو باریت (راست)

و تغییرات خاصیت انگمی در مقابل میزان نانو باریت (چپ)



شکل ۱۰. تغییرات افت وزنی قیر در مقابل میزان نانو باریت (راست) و تغییرات نسبت درجه نفوذ قبل

و بعد از اضافه کردن نانو باریت (چپ)



شکل ۱۱. تغییرات نقطه اشتعال در مقابل میزان نانو باریت (راست) و تغییرات وزن مخصوص در مقابل میزان نانو باریت (چپ)

به روش اختلاط خشک، تهیه شدند. نمودارهای مربوط به پارامترهای کلیدی نظیر استقامت، روانی، وزن مخصوص واقعی، فضای خالی مصالح سنگی VMA و فضای خالی نمونه‌های متراکم شده VTM برای هر درصد قیر رسم گردید. برای تعیین میزان قیر بهینه، سه پارامتر اصلی مدنظر قرار گرفت: فضای خالی ۴ درصد، حداکثر استقامت مارشال و حداکثر وزن مخصوص. با بررسی نمودارهای حاصل از آزمایش مارشال، میزان قیر بهینه برای فیلرهای ۳، ۶ و ۹ درصد به ترتیب ۵/۵، ۴/۹ و ۴/۵ درصد تعیین شد. سایر پارامترهای کیفی مخلوط آسفالتی، مطابق با نشریه ۲۳۴ وزارت راه و شهرسازی کنترل گردید و مشخص شد که تمامی مقادیر در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار دارند. به ویژه، فضای خالی نمونه‌ها، در محدوده ۳ تا ۵ درصد قرار داشت که این مقدار در درصدهای بهینه برای هر سه درصد فیلر (۳، ۶ و ۹ درصد) قابل قبول بود. همچنین، روانی مخلوط آسفالتی طراحی شده برای ترافیک سنگین بین ۲ تا ۳٫۵ میلی‌متر بود که نشان‌دهنده رعایت الزامات فنی مربوطه است. با توجه به نتایج آزمایش مارشال و بعد از رسیدن به درصد قیر بهینه، نمونه‌هایی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم تهیه شدند. از حاصل تقسیم مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک، نسبت TSR به دست می‌آید که شاخصی موثر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. طبق نشریه ۲۳۴ این نسبت نباید کمتر از ۷۰ درصد باشد. درجدول ۵، نتایج کامل آزمایش کشش غیرمستقیم برای مصالح اختلاط تر با درصدهای فیلر ۳ و ۶ و ۹ ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل به صورت مقایسه‌ای در شکل ۱۲، نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۸، مشخص است درجه نفوذ قیر اصلاح شده با باریت، با افزایش میزان درصد آن کاهش یافته است. این روند کاهشی برای درجه نفوذ بعد از آزمایش افت وزنی قیر نیز کاملاً مشخص است. پس از آزمایش افت وزنی قیر درجه نفوذ قیر اصلاح شده کمتر از درجه نفوذ قبل از این آزمایش بوده و روند کاهشی آن با افزایش میزان درصد باریت اضافه شده نیز مشهود است. در شکل ۹، نیز همان‌طور که نشان داده شده است، در اثر افزودن باریت به قیر، شکل‌پذیری قیر کاهش و نقطه نرمی آن افزایش یافته است. در نتیجه باعث افزایش مدول سختی و استحکام مخلوط‌های فیلر-قیر می‌شود. شکل ۱۰، نمودار افت وزنی قیر را نشان داده است که با افزایش میزان درصد باریت اضافه شده به قیر، افت وزنی قیر تحت آزمایش لعاب نازک کاهش داشته است که می‌تواند دلیلی بر بهبود ویژگی‌های قیر توسط باریت باشد که دلیل آن ناشی از واکنش مثبت بین پیوندهای قیر و باریت بوده است.

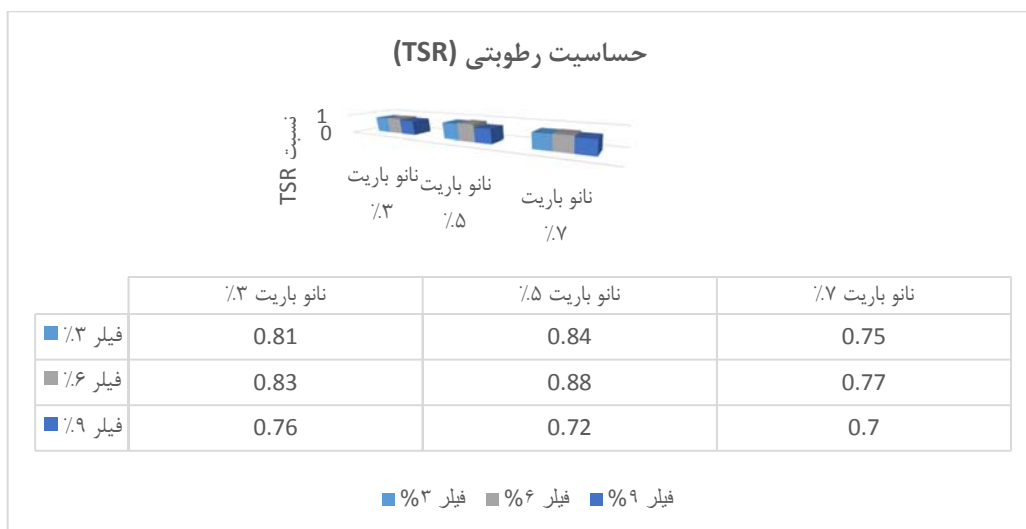
شکل ۱۱، نیز به ترتیب افزایش نقطه اشتعال و چگالی قیرهای اصلاح شده را نشان می‌دهند. حساسیت حرارتی پایین باریت و وزن مخصوص بالای آن می‌تواند دلیلی بر افزایش نقطه اشتعال و افزایش چگالی قیر اصلاحی باشد.

۳-۵-آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و بررسی حساسیت رطوبتی

در این پژوهش، هدف تعیین میزان بهینه قیر در مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانوذرات با استفاده از آزمایش مارشال و روش‌های مرتبط بوده است. ابتدا، نمونه‌های مختلف با درصدهای متفاوت قیر و ۳ درصد فیلر (۳، ۶ و ۹ درصد)

جدول ۵. نتایج کشش غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی برای قیر اصلاح شده با باریت

درصد باریت	مقدار فیلر (%)	ITS خشک (kPa)	ITS اشباع (kPa)	TSR
۳	۳	۲۴۹۹	۲۰۲۴	۰/۸۱
	۶	۲۵۸۱	۲۱۵۳	۰/۸۳
	۹	۲۴۲۵	۱۸۹۰	۰/۷۶
۵	۳	۲۱۶۷	۱۸۲۴	۰/۸۴
	۶	۲۶۳۴	۲۳۱۰	۰/۸۸
	۹	۲۴۱۳	۱۷۴۳	۰/۷۲
۷	۳	۲۱۱۷	۱۵۸۵	۰/۷۵
	۶	۲۰۶۹	۱۵۹۴	۰/۷۷
	۹	۱۹۵۹	۱۳۷۸	۰/۷۰



شکل ۱۲. نمودار نسبت TSR در اختلاط با ۳٪، ۵٪ و ۷٪ نانو باریت

دهد. قرار دادن نمونه‌ها در دمای بالا (۸۵ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۱۲۰ ساعت، فرآیند پیرسازی را تسریع کرده و اثرات بلندمدت دما بر خواص آسفالت را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های پیرشده، مطابق جدول ۶ و شکل ۱۳، می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد پایداری حرارتی مخلوط آسفالتی حاوی باریت ارائه دهد.

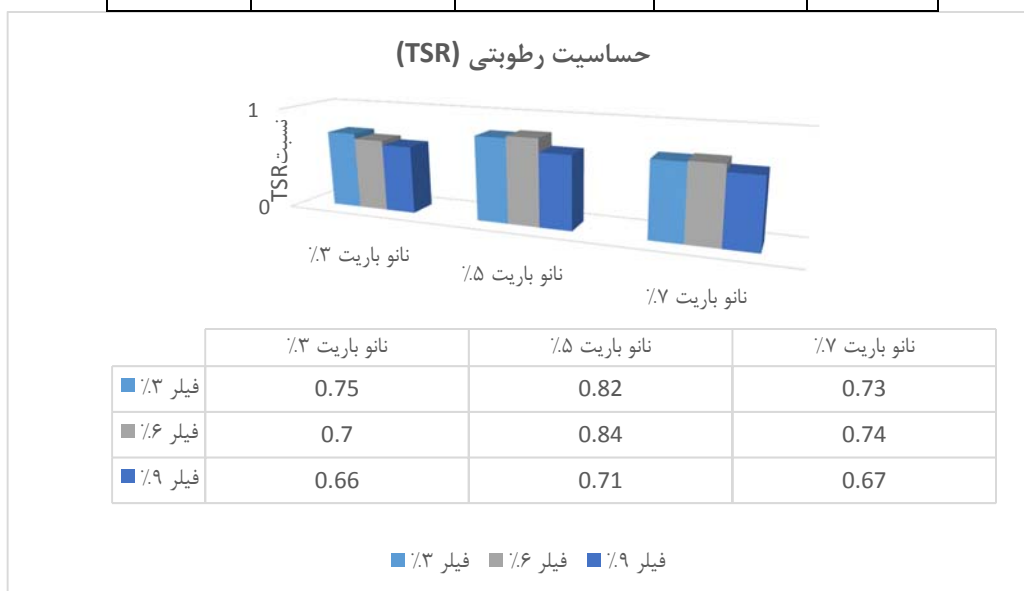
قیر ترکیبی پیچیده از هیدروکربن‌ها است که در دماهای بالا، برخی از اجزای آن فرار volatile می‌شوند. این فراریت، منجر به سفت شدن قیر و کاهش انعطاف‌پذیری آن می‌شود. ذرات باریت، به ویژه نانوباریت، می‌تواند با ایجاد یک ساختار سه‌بعدی در قیر، از حرکت آزادانه مولکول‌های سبک‌تر قیر جلوگیری کرده و فراریت آنها را کاهش دهند.

اکسیداسیون قیر در دماهای بالا، یکی دیگر از عوامل اصلی پیرسازی است. اکسیژن موجود در هوا، با مولکول‌های قیر واکنش داده و ترکیبات قطبی و سفت را تشکیل می‌دهد. باریت، به عنوان یک ماده معدنی غیرقابل اشتعال و غیرفعال، می‌تواند به عنوان یک سد فیزیکی عمل کرده و از نفوذ اکسیژن به درون قیر جلوگیری کند، به ویژه در لایه‌های نزدیک به سطح آسفالت. ذرات باریت می‌تواند با ایجاد یک شبکه فیزیکی در قیر، پایداری ساختاری آن را در دماهای بالا افزایش دهند. این شبکه، از روان شدن قیر در دماهای بالا جلوگیری کرده و از تغییر شکل‌های دائمی در آسفالت جلوگیری می‌کند. افزودن باریت به قیر می‌تواند حساسیت دمایی قیر را کاهش دهد. به این معنی که خواص رئولوژیکی قیر در دامنه وسیع‌تری از دما، پایدارتر باقی می‌ماند. این امر، به ویژه در مناطقی با تغییرات دمایی شدید، بسیار مهم است.

بر اساس جدول ۵، استفاده از نانوباریت، به ویژه در غلظت ۵٪، منجر به بهبود قابل توجه نسبت TSR در نمونه‌های آسفالتی شده است. TSR، معیاری کلیدی برای سنجش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی است و نشان‌دهنده مقاومت مخلوط در برابر کاهش استحکام ناشی از نفوذ آب است. باریت $BaSO_4$ یک ماده معدنی با ساختار کریستالی پایدار و قطبیت پایین است. این ویژگی، سبب کاهش تمایل باریت به جذب مولکول‌های قطبی آب می‌شود. در مقابل، برخی فیلرهای سنتی مورد استفاده در آسفالت (مانند آهک) دارای خاصیت آب‌دوستی بالاتری هستند و می‌تواند با جذب آب، پیوند بین قیر و سنگدانه را تضعیف کنند. ذرات ریز باریت (به ویژه نانوباریت) می‌تواند به عنوان یک عامل پخش‌کننده عمل کرده و به توزیع یکنواخت‌تر قیر در سطح سنگدانه‌ها کمک کنند. این توزیع یکنواخت، پوشش بهتری را برای سنگدانه‌ها فراهم کرده و از نفوذ آب به فصل مشترک قیر-سنگدانه جلوگیری می‌کند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که باریت می‌تواند با افزایش نیروهای پیوستگی بین قیر و سنگدانه‌ها، مقاومت در برابر جداشدگی، ناشی از رطوبت را افزایش دهد. این افزایش پیوستگی می‌تواند ناشی از تعاملات شیمیایی خاص بین سطح باریت و قیر، مانند برهمکنش‌های واندروالس یا ایجاد پیوندهای ضعیف، باشد. افزودن نانوباریت می‌تواند خواص رئولوژیکی قیر را تغییر دهد. به عبارت دیگر، افزایش ویسکوزیته قیر در دماهای بالا و بهبود مدول برشی، می‌تواند به افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های ناشی از رطوبت کمک کند. همچنین، حضور ذرات نانوباریت می‌تواند از حرکت آزادانه مولکول‌های قیر جلوگیری کرده و پایداری ساختار قیر را در برابر رطوبت افزایش

جدول ۶. نتایج کشش غیر مستقیم و حساسیت رطوبتی برای قیر اصلاح شده با باریت پس از پیرشدگی

درصد باریت	مقدار فیلر (%)	ITS خشک (MPa)	ITS اشباع (MPa)	TSR
۳	۳	۱/۶۱۶	۱/۲۱۲	۰/۷۵
	۶	۱/۶۵۴	۱/۱۵۹	۰/۷۰
	۹	۱/۶۱۵	۱/۰۵۹	۰/۶۶
۵	۳	۱/۵۱۱	۱/۲۳۳	۰/۸۲
	۶	۱/۶۹۹	۱/۴۲۶	۰/۸۴
	۹	۱/۳۲۷	۰/۹۴۸	۰/۷۱
۷	۳	۱/۲۵۵	۰/۹۲۰	۰/۷۳
	۶	۱/۲۶۱	۰/۹۲۳	۰/۷۴
	۹	۱/۱۵۱	۰/۷۶۶	۰/۶۷



شکل ۱۳. نمودار نسبت TSR با ۳٪، ۵٪ و ۷٪ نانو باریت پس از پیرشدگی

۴-تحلیل آماری نتایج

تحلیل آماری تی t-test مطابق جدول ۷، نشان می‌دهد که افزودن باریت به مخلوط قیر و آسفالت، به طور معناداری رفتار TSR را تحت تاثیر قرار می‌دهد ($P < 0/05$). مقادیر بالای آماره تی و انحراف معیار پایین، دقت و اعتبار این یافته‌ها را نشان می‌دهد. افزودن درصد‌های مختلف باریت، ۳٪، ۵٪ و ۷٪، اثرات قابل توجهی در رفتار TSR ایجاد می‌کند. این نتایج اولیه، تاثیر باریت بر خواص قیر و آسفالت را تایید و لزوم مطالعات بیشتر را ضروری می‌سازد. همان‌طور که از نتایج جدول ۷، مشخص است، سطح معنی‌داری که به ازای sig کمتر از ۰/۰۵ تعریف شده است در تمام مقایسات نتیجه داده است و این به معنی صحه گذاشتن مقایسات انجام گرفته در بندهای قبلی است.

با توجه به جدول ۶ و شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که نسبت TSR که بیانگر شرایط حساسیت رطوبتی بوده است در نمونه‌هایی که با قیر اصلاح شده توسط نانوباریت استفاده شده‌اند به مراتب شرایط بهتری را به وجود آورده‌اند. در بین نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده نیز نمونه‌هایی که با قیر اصلاح شده ۵٪ باریت ساخته شده‌اند شرایط مطلوب‌تری را از نظر حساسیت رطوبتی بعد از پیرشدگی به وجود آوردند. به عنوان مثال قیر اصلاح شده با نانو باریت ۵٪ و نمونه دارای فیلر ۶٪ دارای حساسیت رطوبتی ۰/۸۴ می‌باشد که این عدد برای نمونه‌های با قیر اصلاح شده ۵، و فیلر ۹٪ برابر ۰/۷۱ می‌باشد که نشان دهنده بهبود و افزایش نسبت TSR به مقدار ۱۸ درصد بوده است.

جدول (۷): نتایج تحلیل T تأثیر اختلاط قیر و باریت بر عملکرد حساسیت رطوبتی

نوع مقایسه	Mean	N	Std. Deviation	t	df	Sig. (2-tailed)
مقایسه باریت ۳٪	۰/۸۰۰۰	۳	۰/۰۳۶۰۶	۳۸/۴۳۱	۲	۰/۰۰۱
مقایسه باریت ۵٪	۰/۸۱۳۳	۳	۰/۰۸۳۲۷	۱۶/۹۱۸	۲	۰/۰۰۳
مقایسه باریت ۷٪	۰/۷۴۰۰	۳	۰/۰۳۶۰۶	۳۵/۵۴۸	۲	۰/۰۰۱

۵- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی اثرات افزودن باریت (به شکل پودر و نانوذرات) بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، به ویژه در زمینه حساسیت رطوبتی و پایداری حرارتی، پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از باریت، چه به عنوان جایگزین فیلر معمولی و چه به عنوان اصلاح‌کننده قیر، منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد آسفالت می‌شود. برخی نتایج مهمتر عبارتند از:

-در بررسی حساسیت رطوبتی، نمونه‌های حاوی ۶٪ پودر باریت، به میزان قابل توجه ۴۰٪ بهبود (کاهش نسبت TSR از ۰/۹۲ به ۰/۶۵) را در مقایسه با نمونه‌های حاوی فیلر معمولی نشان دادند.

-آنالیز T نیز این بهبود آماری معنادار را تایید نمود. همچنین، استفاده از قیر اصلاح شده با نانو باریت به مراتب اثرات مثبت تری در کاهش حساسیت رطوبتی داشت. به عبارتی، نمونه‌های حاوی قیر اصلاح شده با ۵٪ نانو باریت و ۹٪ فیلر، مقدار TSR برابر با ۰/۷۲ را نشان دادند که ۲۰٪ بهتر از نمونه‌های مشابه با ۶٪ فیلر، TSR برابر با ۰/۸۸، بود.

-تحلیل خواص حرارتی قیر اصلاح شده با نانو باریت، با استفاده از آزمون DSC نشان داد که افزودن نانوذرات باریت، پایداری

در برابر تغییر شکل حرارتی است. -آزمایش‌های دیگر قیر، نیز نشان دادند که افزودن باریت به قیر، باعث کاهش شکل‌پذیری و افزایش نقطه نرمی قیر می‌شود که این تغییرات، مدول سختی و استحکام مخلوط‌های فیلر-قیر را افزایش می‌دهند. کاهش افت وزنی قیر با افزایش میزان باریت نیز نشان‌دهنده بهبود ویژگی‌های قیر در اثر واکنش مثبت بین پیوندهای قیر و باریت است. در نهایت، افزایش نقطه اشتعال و چگالی قیرهای اصلاح شده با باریت، ناشی از حساسیت حرارتی پایین و وزن مخصوص بالای باریت می‌باشد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، استفاده از باریت ضایعاتی، به ویژه در قالب نانوذرات، می‌تواند به عنوان یک راهکار موثر و مقرون به صرفه در بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی، به ویژه در مناطق گرمسیر با رطوبت بالا، مد نظر قرار گیرد.

۶- مراجع

-Al-Omari, A., Taamneh, M., Imam, R., & Khafaja, D. A. D. (2023). The effects of adding nano clay and nano zinc oxide on asphalt cement rheology. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 35(4), 269-296.
doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.010

-Calandra, P., Quaranta, S., Figueira, B. A. M., Caputo, P., Porto, M., & Rossi, C. O. (2022). Mining wastes to improve bitumen performances: An example of circular economy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 614, 277-287.
doi.org/10.1016/j.jcis.2022.01.106

-Abdel-Wahed, T., Abdel-Raheem, A., & Moussa, G. (2022). Performance Evaluation of Asphalt Mixtures Modified with Nanomaterials. *MEJ-Mansoura Engineering Journal*, 47(1), 1-15.
doi.org/10.21608/bfemu.2022.221670

-Alfaqawi, R. M., Fareed, A., Zaidi, S. B. A., Airey, G. D., & Rahim, A. (2022). Effect of hydrated lime and other mineral fillers on stiffening and oxidative ageing in bitumen mastic. *Construction and Building Materials*, 315, 125789.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125789

- Nabiun, R., Nasajpour-Esfahani, N., Jasim, D. J., Mirvalad, S., Garmestani, H., & Toghraie, D. (2024). Laboratory evaluation of mechanical properties and noise absorption in magnetite-enhanced concrete for pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03570. doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03570
- Shi, B., & Zhou, S. (2024). Application of fume silica nanoparticles to improve high-temperature rheological performance of terminal blend rubberized asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03276. doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03276
- Tian, Y., Sun, L., Li, H., Zhang, H., Harvey, J., Yang, B., & Fu, K. (2021). Laboratory investigation on effects of solid waste filler on mechanical properties of porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 279, 122436. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122436
- Xing, B., Fang, C., Lyu, X., Fan, W., & Lyu, Y. (2024). Influence of mineral filler characteristics on the filler–asphalt interfacial behavior. *Advanced Powder Technology*, 35(10), 104636. doi.org/10.1016/j.apt.2024.104636
- Yilmaz, B., Özdemir, A. M., & Gürbüz, H. E. (2023). Assessment of thermal properties of nanoclay-modified bitumen. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4), 4595-4607. doi.org/10.1007/s13369-022-07142-4
- Zhang, G., Wang, M., Yang, J., Wu, M., Ding, Q., & Zhu, J. (2024). Preparation of barium alumino-silicate based ceramsite from bauxite, coal gangue and barite: Physical properties, microstructure, and γ -ray shielding behavior. *Construction and Building Materials*, 437, 136965. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136965
- Zhang, H., Duan, H., Zhu, C., Chen, Z., & Luo, H. (2021). Mini-review on the application of nanomaterials in improving anti-aging properties of asphalt. *Energy & Fuels*, 35(14), 11017-11036. doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.1c01035
- Zhu, X., Cai, Y., Zhong, S., Zhu, J., & Zhao, H. (2017). Self-healing efficiency of ferrite-filled asphalt mixture after microwave irradiation. *Construction and Building Materials*, 141, 12-22. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.145
- Chakravarty, H., & Sinha, S. (2020). Moisture damage of bituminous pavements and application of nanotechnology in its prevention. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 03120003. doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003293.
- Chitsazan, A. (2023), Laboratory Evaluation of the Effect of Natural Zeolite as Warm Mix Asphalt Additive on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixture with an Environmental Approach, Road No.117, Road Scientific Quarterly, Year 21, Vol. 4, Issue 117, Winter 2023[in Persian]. doi.org/10.22034/road.2023.178911
- Dimulescu, C., & Burlacu, A. (2021). Industrial waste materials as alternative fillers in asphalt mixtures. *Sustainability*, 13(14), 8068. doi.org/10.3390/su13148068
- Jwaida, Z., Al Quraishy, Q. A., Almuhan, -R. R., Dulaimi, A., Bernardo, L. F. A., & Andrade, J. M. D. A. (2024). The Use of Waste Fillers in Asphalt Mixtures: A Comprehensive Review. *CivilEng*, 5(4), 801-826. doi.org/10.3390/civileng5040042
- Karslıoğlu, A., Onur, M. İ., & Balaban, E. (2022). Investigation of boron waste usage in civil engineering applications. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 727-735. doi.org/10.28948/ngumuh.1084831
- Lopresti, M., Palin, L., Alberto, G., Cantamessa, S., & Milanese, M. (2021). Epoxy resins composites for X-ray shielding materials additivated by coated barium sulfate with improved dispersibility. *Materials Today Communications*, 26, 101888. doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101888
- Mamuye, Y., Liao, M. C., & Do, N. D. (2022). Nano-Al₂O₃ composite on intermediate and high temperature properties of neat and modified asphalt binders and their effect on hot mix asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 331, 127304. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127304
- Meng, Y., Chen Xing, J., Kong, W., & Hu, Y. (2023). Review of emulsified asphalt modification mechanisms and performance influencing factors. *Journal of Road Engineering*, 3(2), 141-155. doi.org/10.1016/j.jreng.2023.01.006

The Effect of Barite Waste on the Behavior of Bitumen and Asphalt Mixture: Investigating Moisture Sensitivity and Thermal Stability (DSC)

*Omid Ansari, M.Sc., Grad., Engineering Faculty,
Yazd University, Yazd, Iran.*

*Mohammad Mehdi Khabiri, Associated Professor, Engineering Faculty,
Yazd University, Yazd, Iran.*

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

ABSTRACT

This research examines the effects of using barite powder as a filler and nano barite as a modifier for bitumen on improving the moisture sensitivity and thermal performance of asphalt mixtures. Asphalt samples were prepared using barite powder as a substitute for the conventional filler (dry mixing) and bitumen modified with nano barite (wet mixing). The results of Marshall stability and moisture sensitivity tests indicated a significant improvement in the performance of asphalt mixtures containing barite in both mixing methods compared to samples with conventional filler. Specifically, the moisture sensitivity for samples containing 6% barite showed a 40% improvement (0.92 compared to 0.65 for the conventional filler). A T-test also confirmed this statistical improvement. Additionally, the properties of bitumen modified with nano barite were evaluated using standard bitumen tests and differential scanning calorimetry (DSC). The DSC results showed that modifying bitumen with nano barite leads to an improvement in thermal stability. The penetration degree of bitumen modified with 3%, 5%, and 7% nano barite decreased, 65, 61, and 57 compared to 68 for the control bitumen, indicating an increase in hardness and resistance to thermal deformation.

Keywords: Barite Powder, Nanomaterials, Bitumen Modification, Differential Scanning Calorimetry, Moisture Sensitivity